

Бадеха К.А., Яковлев Г.А., Гроховский В.И.
ksenia_uimina@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ FE-NI ВОКРУГ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В АТАКСИТАХ

Аннотация. В работе исследовалась структура плессита вблизи неметаллических включений в образцах метеоритов (15-18 вес.% Ni): Чинге, Iquique, Hoba, Cape of Good Hope, Gebel Kamil, Tawallah Valley, El Qoseir. Для изучения кристаллографических закономерностей в плессите был применен метод EBSD и EDX, реализованные на растровом электронном микроскопе ZEISS SIGMA VP.

Ключевые слова: метеориты IVB группы, плессит, структура, неметаллические включения, троилит, добреелит, хромит, фосфид, фазовые превращения, EBSD анализ.

Abstract. The work is devoted to the research of plessite microstructure near non-metal inclusions in high-Ni meteorites (15-18 wt.% Ni): Chinga, Iquique, Hoba, Cape of Good Hope, Gebel Kamil, Tawallah Valley, El Qoseir. EBSD method was applied to reveal crystallographic orientations in plessite. EDX was applied to reveal chemical composition. It was realized on ZEISS SIGMA VP scanning electron microscope.

Key words: IVB group meteorites, plessite, structure, nonmetallic inclusions, troilite, daubréelite, chromite, phosphide, phase-transformations, EBSD-analysis.

Введение

При охлаждении метеорита с содержанием Ni от 10 до 20 об.%. от высоких температур разделение ОЦК α - и ГЦК γ -фазы на отдельные фазы не происходит, и образуется двухфазная смесь – плессит, где один из компонентов проявляется в виде островков внутри другого. Плессит можно рассматривать как перенасыщенный твердый раствор γ -фазы относительно α -фазы. Группа высоконикелевых (15-18 вес.% Ni) железных метеоритов отличается ярко выраженной структурой плессита, состоящей в основном из смеси субмикроскопических ОЦК и ГЦК фаз Fe(Ni). Лишь изредка встречаются мелкие 15х100 мкм балки α - Fe(Ni), которые представляют собой лишь зарождающуюся октаэдрическую (Видманштетовую) структуру из-за низкотемпературного превращения.

При травлении полированных шлифов представителей этой группы выявляются параллельные полосы шириной 1-10 см, обладающие селективным отражением (ПСО) и различимые невооруженным глазом [1, 2]. Области ПСО образованы мелкодисперсной направленной структурой плессита, которая

создает контраст в отраженном свете и наиболее ярко наблюдается в поляризованном освещении.

Методами рентгенографии было показано, что структура не является двойником [2, 3]. Нами это явление наблюдалось в ряде образцов метеоритов группы IVB и не сгруппированных атакситов, близких к ним по составу. Так же, как и в земных сплавах, выращенных в виде монокристаллов [4], в метеоритном металле наблюдается подобие мартенситного превращения – низкотемпературное фазовое превращение сдвигового типа, которое ведет к образованию пакетов кристаллов с определенной ориентацией. Этот эффект и образует ПСО в макромасштабе, когда группа кристаллитов α -фазы в мартенсите закономерно ориентирована по отношению к плотноупакованному направлению исходного кристалла γ -фазы, однако в различных участках металла преимущественная ориентация кристаллитов различна, но соответствует общему для них набору ориентировок [1, 5].

Явление ПСО можно подразделить на несколько подвидов (Таблица 1), так как селективный блеск присутствует не только в виде полос (Kokomo, Santa Klara, Dumont, Cape of Good Hope, Чинге, Iquique), но также в виде клиньев и пятен (Tlakotepes, Hoba) или нерегулярных участков селективного блеска (Wever Mountains, Tawallah Valley, Gebel Kamil). Это зависит от структуры, образующей макроэффект, которая в свою очередь определяется химическим составом металла, а именно содержанием Р [4, 6].

Присутствие Р в металле снижает температуру зарождения, уже заниженную присутствием Ni, влияет на ход реакции и скорость диффузии Ni при диффузионном росте балок α -фазы, формирующих структуру видманштетта в менее высоконикелевых сплавах [7, 8, 9]. В случае атакситов эта структура не успевает сформироваться за счет быстрого остывания до наступления процесса мартенситного превращения, и остается в стадии зародышей балок α -фазы (α -зерен).

В зависимости от содержания Ni и Р в сплаве авторы [9] подразделяют механизм формирования плессита на три типа: $\gamma \rightarrow (\alpha + \gamma) \rightarrow \alpha + \gamma + Ph$ (Cape of Good Hope, Hoba), $\gamma \rightarrow \gamma + Ph \rightarrow \alpha + \gamma + Ph$ (Чинге, Tawallah Valley), $\gamma \rightarrow \alpha_2 + \gamma \rightarrow \alpha + \gamma$ (El Qoseir). Более высоконикелевые метеориты, как правило, обладают и большим содержанием Р, и зародыши α -фазы в них встречаются чаще, а матрица плессита становится более тонкой и ориентированной (Tawallah Valley, Warburton range), по сравнению с Cape of Good Hope, Hoba, Чинге. Лишь в случае El Qoseir мы наблюдаем высокое содержание Р при относительно низком содержании Ni – 14

вес.% – и массивное образование балок α -фазы, которые тем не менее остаются в виде зародыша структуры видманштетта, однако являются более развитыми, чем во всех других рассмотренных атакситах.

Таблица 1 – Характеристики метеоритов, демонстрирующих ПСО

Наименование	Микро- твердость [7]	Размер ча- стиц: ОЦК/ГЦК	Размер ба- лок камасита	Тип ПСО
Kokomo, IVB	HV 178 \pm 7.	1-5 мкм/1-3 мкм	20 \pm 10 х 50-150 мкм	0,1-10 мм, Паралл.
Cape of Good Hope, IVB	HV 244 \pm 8	>0,5-2 мкм	2х30 мкм**	1-30 мм, Паралл.
Чинге, несгр.	HV 300 \pm 6.	0,2/0,1 мкм	3х50 мкм**	1-10 мм, Паралл.
Iquique, IVB	HV 204 \pm 8	/0,5-2 мкм	150х20 мкм	1-8 мм, паралл., и от- дельные полосы
Skookum, IVB	HV 260 \pm 25	1 мкм/0,5мкм	10-15 х 100 мкм	1-10 мм, паралл.
Tlacotepec, IVB	HV 242 \pm 8	0,5-2 мкм/0,2 – 1 мкм	30 \pm 15 х 500 мкм	1 мм -> 10 см, пятна 3-4 оттенка
Hoba, IVB	HV 270 \pm 10	0,5-2 мкм	3х40 мкм**	>10 см, паралл., кли- нья, 3-4 оттенка
Gebel Kamil, несгр.		1-5 мкм	20 \pm 5 мкм	0,1-2,5 мм, Прожилки
Weaver Moun- tains, IVB	HV 300 \pm 15		6 \pm 3 х 60 мкм	Нерегулярный [8]
Tawallah Valley, IVB	HV 205 \pm 10		8 \pm 4 мкм	Подавл., 3-4 оттенка

Было показано на примере Чинге [1], что мартенсит распадется по направлениям, близким к ориентационным соотношениям Курдюмова-Закса с родительским тэнитом. Благодаря выполнению ориентационного соотношения методами EBSD выявляются по 6 ориентировок зерен α -фазы в каждой полосе, развернутых вокруг одной оси, что соответствует строению пакетного мартенсита [4].

Присутствие P, S и Cr в железных метеоритах приводит к образованию выделений шрейберзита $(\text{FeNi})_3\text{P}$, троилита (FeS) , добреелита $(\text{FeCr}_2\text{S}_4)$. При рассмотрении невооруженным глазом и в оптический микроскоп метеоритов Ноба и Gebel Kamil была замечена ориентированная структура плессита, напоминающая видманштетт [8], вблизи крупных двухфазных неметаллических включений троилита-добреелита (Рис. 1). Такие включения прямоугольной формы также встречаются и в метеоритах Iquique [2], Чинге [10], Cape of Good Hope, однако структуры видманштеттового плессита [8] вокруг них не наблюдается. Метеорит El Qoseir также обладает матрицей в виде ориентированного плессита во всем объеме. Однако в нем активно распространены мелкие балки α -фазы с многочисленными включениями шрейберзита.

В данной работе нами анализировалась структура видманштеттового плессита, которая появляется вблизи неметаллических включений в матрице мелкодисперсного плессита, направленность которого глазом определить невозможно. Также было проведено сравнение ориентировок плессита вблизи включений и плессита, образующего ПСО.

Образцы и методика эксперимента

Для исследования были выбраны и подготовлены по стандартной методике шлифы следующих атакситов (Таблица 1): Чинге (16,58 вес.% Ni, 0,55 вес.% Co, 0,05 вес.% P), Iquique (15,7 вес.% Ni, 0,74 вес.% Co, 0,05 вес.% P), Ноба (16,4 вес.% Ni, 0,79 вес.% Co, 0,05 вес.% P), Cape of Good Hope (16,5 вес.% Ni, 0,76 вес.% Co, 0,07 вес.% P), Tawallah Valley (18,4 вес.% Ni, 0,80 вес.% Co, 0,22 вес.% P), El Qoseir (14,0 вес.% Ni, 0,7 вес.% Co, 0,16 вес.% P), Gebel Kamil (20,7 вес.% Ni, 0,75 вес.% Co, 0,14 вес.% P).

Из образцов метеоритов, взятых из коллекции УрФУ, ГЕОХИ РАН и музея Истории Мироздания (г. Дедовск), были изготовлены плоскополированные шлифы от 5x5 мм (Tawallah Valley, Gebel Kamil) до 30x50 мм (Ноба, Чинге). При полировке использовалась стандартная методика с применением алмазных паст и финишной полировке в SiO_2 с размером частиц 0,04 мкм. Исследование проводилось на оптическом микроскопе Zeiss Axiovert 40 MAT и растровом электронном микроскопе ZEISS SIGMA VP с приставками для EBSD и EDX анализа. Химический состав анализировался по точкам и при анализе небольших площадей $\sim 5 \times 5$ мкм.

Таблица 2 – Химический состав рассмотренных сплавов

Название	Ис-точ-ник	Ni, [wt.%]	Co [ppm]	P [ppm]	V	Mn	Cr [ppm]	Cu [ppm]	Zn [ppm]
Чинге	11	16,58	5500	500					
	12	16,5	5770				890		
Cape of Good Hope	13	15,64 ±0,16	7820 ±30	445 ±13	0,95 ±0,04		261 ±20	1,48 ±0,06	
	14	16,5 ±0,3	7650 ±80	740 ±320	0,77 ±0,08	2,4 ±0,1	210 ±6	1,0 ±0,2	0,7±0,2
Hoba	13	16,33 ±0,10	7820 ±30	445 ±13	1,08 ±0,34		178 ±14	1,62 ±0,07	
	14	16,4 ±0,2	7890 ±55	550 ±77	0,7 ±0,04	0,95 ±0,09	190 ±3	2,2 ±0,1	0,40 ±0,07
Iquique	12	16,0	7420				275		
	14	15,7 ±0,2	7430 ±65	500 ±260	1,14 ±0,06	2,1 ±0,2	294 ±12	1,30 ±0,04	0,5
Gebel Kamil	15	20,6	7600					436	0,6
	13	20,7	7561	1100	<1		22	548	
Tawallah Valley	14	18,4 ±0,4	7980 ±65	2220 ±470	0,112 ±0,007	1,49 ±0,06	67 ±2	1,5 ±0,2	0,4
	13	17,94 ±0,24	8158 ±41	1762 ±377	0,09 ±0,01		36 ±3	1,87 ±0,05	
El Qoseir	7	14,0	7000	1600					
	16	14,85	700	1600				300	

Результаты и обсуждение

В рассмотренных метеоритах Чинге, Ноба, Iquique присутствие Р незначительно, и ПСО образуются структурами, направленность которых сложно оценить даже в электронный микроскоп. Плессит мелкодисперсен и образован продуктами распада мартенсита [1, 2, 11].

El Qoseir, Tawallah Valley и Gebel Kamil демонстрируют легко различимую ориентированную структуру плессита, котрая, сформировалась за счет высокого содержания Р в виде мелких включений шрейберзита $(\text{FeNi})_3\text{P}$. Тот же эффект мы наблюдаем в метеорите Ноба вблизи крупных (0,5х1,5 мкм) включений $\text{FeS-FeCr}_2\text{S}_4$ (Рис. 1).

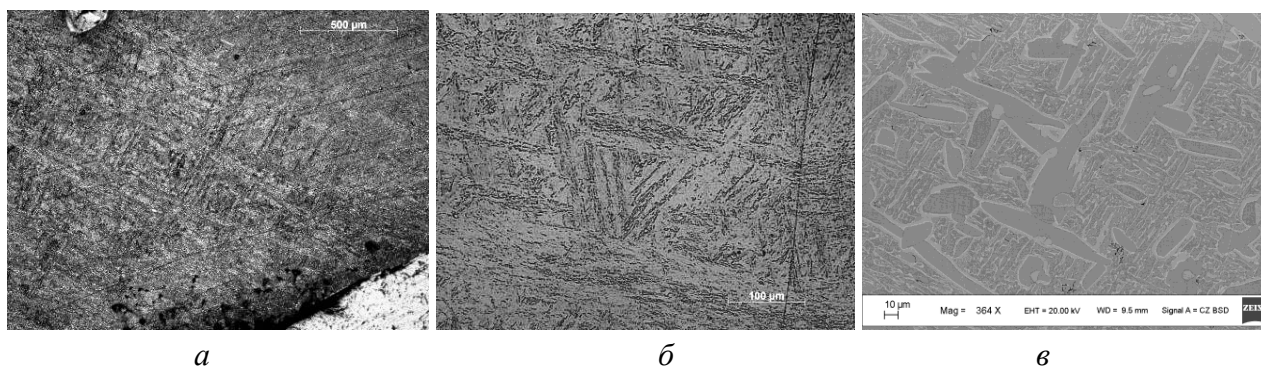


Рисунок 1 – Структура плессита вблизи крупных неметаллических включений:
а – включения троилита-добреелита в метеорите Noba с ориентированной структурой, *б* – структура Gebel Kamil вблизи крупного включения хромита-фосфида, *в* – структура металла в метеорите El Qoseir: ориентированный плессит располагается между множественными балками α -фазы, в которых зачастую встречаются зародыши неметаллических включений

В плессите метеорита Cape of Good Hope, Noba, Iquique изредка появляются выделения α -фазы веретенообразной формы размером $\sim 30 \times 300$ мкм, окаймленные 3-5 мкм кольцами γ -фазы. Некоторые веретена имеют крошечные зародыши шрейберзита $(\text{FeNi})_3\text{P}$, другие – зародыши добреелита или троилита. Известно [7, 11], что на границе фаз зарождение происходит предпочтительно, а троилит, добреелит, хромит и фосфид являются более высокотемпературными фазами, чем α -фаза, поэтому они уже присутствуют в расплаве, когда в первичном γ -монокристалле происходит зарождение и рост α -веретен.

Сульфидные включения размером 0,1-3 мм и их скопления встречаются с частотой 1 на 25 см², подобные результаты даны и в работе [7]. Как правило, включение содержит около 30% добреелита в виде параллельных 3-30 мкм полос.

Метеорит Iquique в изученных образцах (крупный шлиф 5x3 см и срез с торца изученного образца 3x2 см) демонстрировал лишь редкие параллельные полосы, образованные одним рядом направленных зерен α -фазы, которые наблюдались под микроскопом. Часто встречаются одиночные включения троилита округлой и изогнутой формы, добреелита часто ограненной формы и фосфидов. Крупных включений не было обнаружено. Был обнаружен один случай стростания троилита-добреелита в соотношении 50x50, без ламелей. Включения служат источниками зарождения веретен и небольших балок α -фазы. Плессит в Iquique имеет размер зерен α -фазы, сопоставимый с Noba, и выраженную единообразную ориентацию, которую перпендикулярно пересекают редкие полосы α -зерен, образующих ПСО.

В исследованном образце Cape of Good Hope наблюдается скопление трех крупных включений троилита-добреелита вытянутой или ромбической формы, а также одиночные включения. Во многих включениях присутствуют следы двойникования в троилите, искажение ламелей добреелита, трещины на периферии включений. Также был отмечен выход параллельных ламелей добреелита за пределы включения, и их распространение внутри α -каймы на расстояние до нескольких мкм в небольшом включении $\text{FeS-FeCr}_2\text{S}_4$. До освежения полировки обращал на себя внимание $\sim 1,5$ мм- ореол вокруг включений, который свидетельствует об окислительном процессе. Химический анализ включения троилит-добреелит в Cape of Good Hope показал наличие V, который уверенно определяется в хромистом троилите и Mn в добреелите: Троилит – 58,5 вес.% Fe, 35,7 вес.% S, 5,0 вес.% Cr, 0,8 вес.% V, добреелит – 40,5 вес.% S, 30,3 вес.% Cr, 28,6 вес.% Fe, 0,6 вес.% Mn. Искращения структуры плессита вокруг включений нет. В метеорите Cape of Good Hope направленная упорядоченная структура в плессите зачастую видна без травления. Вокруг включений она не видоизменяется, иногда граница области ориентированного плессита проходит через включение.

Также крупные включения троилита-добреелита встречаются в метеорите Ноба. Из-за легкой пластической деформации часто добреелитовые ламели раздроблены, а троилит рекристаллизован в 2-25 мкм блоки [7]. Как и в Cape of Good Hope, прослеживается обогащение ламелей добреелита Mn в троилит-добреелитовом включении: 57,2 вес.% S, 27,7 вес.% Cr, 14,4 вес.% Fe, 0,8 вес.% Mn. Троилит в Ноба не продемонстрировал наличия V: 51,1 вес.% S, 48,2 вес.% Fe, 0,4 вес.% Cr. Подобная особенность характерна также для Чинге – обогащение троилита V до 0,83 вес.% [10]. Обогащение V и Mn часто встречается для разных групп метеоритов [7, 18], но редко отмечается для атакситов. Таким образом, в метеорите Ноба включения $\text{FeS-FeCr}_2\text{S}_4$ не обогащены V, тогда как в Чинге и Cape of Good Hope он присутствует в троилите. Редко наблюдался рост α -веретен из каймы α -фазы вокруг включения троилит-добреелит.

В метеорите Ноба участки видманштеттового плессита встречаются вокруг каждого включения троилит-добреелит [7, 8] (Рис. 1 б). EBSD-анализ ориентации α - и γ -фаз в области видманштеттового плессита и области ПСО в Ноба показал один и тот же набор ориентировок [1] (Рис. 2). Были изучены ориентации α -веретен, образующих сростания и имеющих видманштеттовые направления. Анализ ППФ показал, что в пределах одного сростания α -веретен (зачастую, сформированных вокруг одного включения $\text{FeS-FeCr}_2\text{S}_4$ в сростании с $(\text{FeNi})_3\text{P}$)

ориентация α -фазы практически единообразна, несмотря на вытянутость зерен в разных видманштеттовых направлениях. Набор ориентаций в веретнах α -фазы совпадает с набором ориентаций в ПСО и в видманштеттовом плессите.

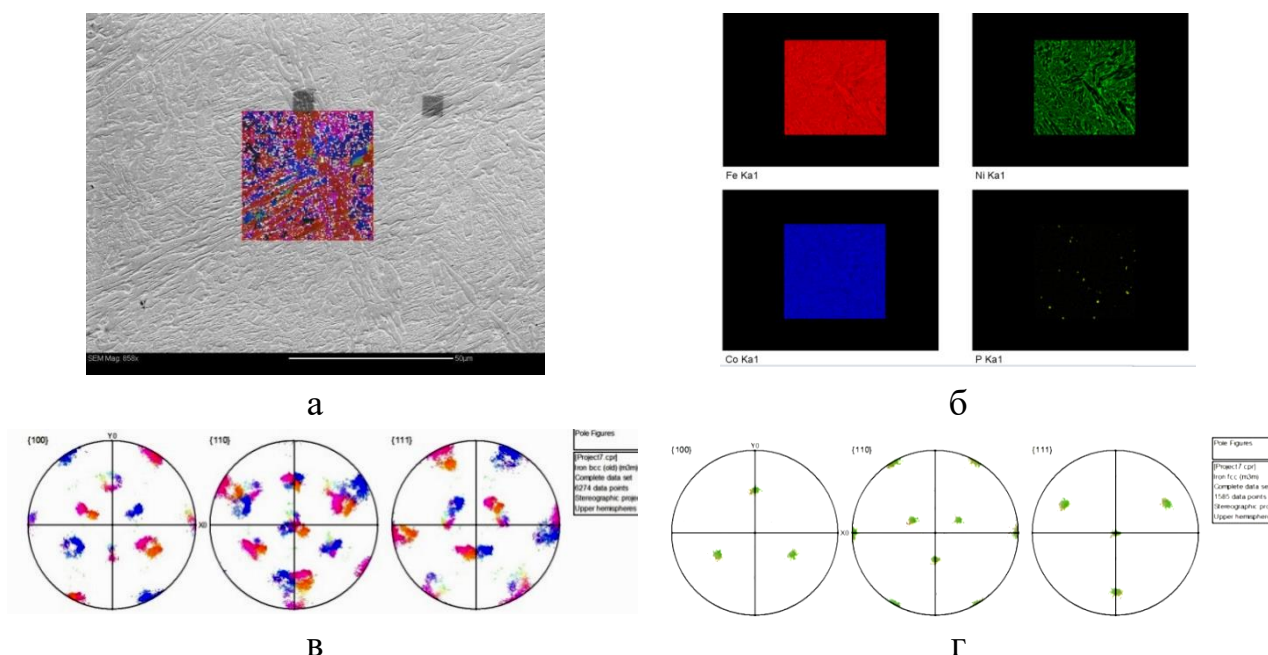


Рисунок 2 – Анализ методом EBSD и EDX участка видманштеттового плессита вблизи включения $\text{FeS-FeCr}_2\text{S}_4$ в метеорите Ноба: *а*- Снимок в отраженных электронах области сканирования с наложением карты ориентации ОЦК-фазы, *б* – распределение химических элементов в зоне анализа: Fe (красным), Ni (зеленым), Co (синим), P (желтым), *в* – ППФ для ОЦК-фазы, *г* – ППФ для ГЦК-фазы

С помощью метода EDX был проведен химический анализ области вокруг включения троилит-добреелит в Ноба. При сканировании площадей 100×100 мкм и 50×50 мкм наличие P не просматривалось в итоговом спектре. Содержание Ni для участка 100×100 мкм составляло 16,76 вес. % (что совпадает с данными [7], а для участка 50×50 мкм составляло 17,2-17,3 вес.% (по данным 10 измерений). При точечном анализе областей γ -фазы, окружающих субзерна α -фазы в распавшемся мартенсите [1, 11], были обнаружены микровключения шрейберзита (Рис. 3, Таблица 3).

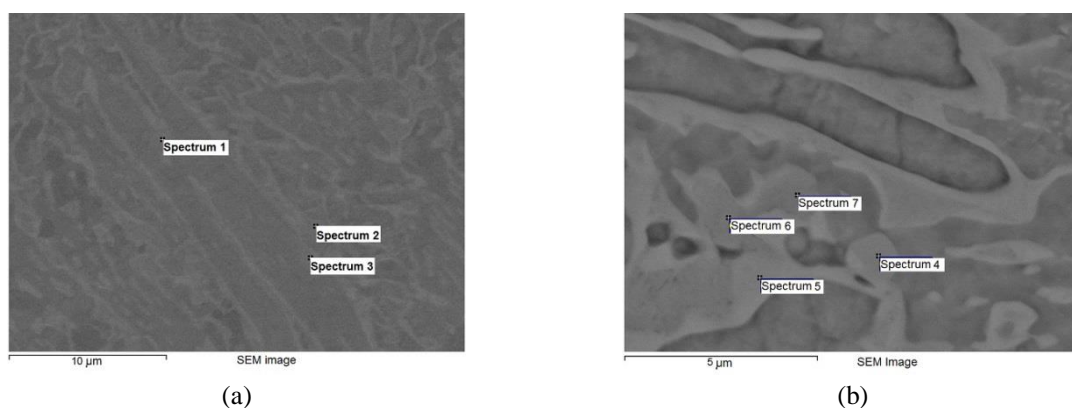


Рисунок 3 – EDX анализ ориентированного плессита в метеорите Ноба:
(a), (b) – Электронное изображение участка плессита с указанием точек,
в котрых анализировался химический состав. Видна структура плессита
с разным увеличением

Анализируя количественный состав фаз в рассмотренных спектрах, видно, что микровключения (рис.3) соответствуют шрейберзиту $(\text{FeNi})_3\text{P}$. Их местонахождение можно объяснить тем, что железо в γ -фазе может содержать больше P, чем в α -фазе [9]. Однако остается неизвестным, почему скопления микровключений шрейберзита образуются именно вблизи крупных включений троилита-добреелита.

Таблица 3 – EDX-анализ ориентированного плессита в метеорите Ноба

№ спектра	P, вес. %	Fe, вес. %	Co, вес. %	Ni, вес. %	Итого, вес. %
Spectrum 1	13.26	40.01	0.41	46.32	100.00
Spectrum 2		82.44	1.01	16.55	100.00
Spectrum 3	12.06	42.34	0.39	45.21	100.00
Spectrum 4	12.72	41.80	0.45	45.03	100.00
Spectrum 5		54.32	0.53	45.15	100.00
Spectrum 6		76.26	0.89	22.85	100.00
Spectrum 7		79.89	0.97	19.13	100.00

Структуры видманштеттового плессита располагаются как в «светлой» или «темной» ПСО. Однако видимых искажений в макро-картину ПСО эти структуры не вносят и не создают дополнительных бликов. Согласно данным EBSD анализа (рис.2 в), направленность плессита в них совпадает с плесситом в ПСО вдали от включений, хотя визуально плессит в ПСО выглядит разупорядоченным.

Известно [11], что более высоконикелевые метеориты обладают и большим содержанием Р. Зародыши α -фазы в них встречаются чаще, а плессит становится более тонким и ориентированным (Tawallah Valley). Tawallah Valley также демонстрирует наличие множества включений типа шрейберзита (FeNi_3P): Fe – 37,32 вес.%, Ni – 46,29 вес.%, P – 10,89 вес.%, Co – 0,17 вес.%, вокруг которых во всех случаях образованы α -зерна, чаще всего неправильной формы: Fe – 89,5 вес.%, Ni – 7,06 вес.%, Co – 0,98 вес.%, P – 0,21 вес.%.

Матрица Gebel Kamil (20,7 wt.% Ni, 0,16 wt.%P) представляет собой дулексный плессит, состоящий из приблизительно равного количества α - и γ -фаз, упорядоченных повсеместно в микро-видманштеттовую структуру. Множественные включения наблюдаются в α -зернах. Также встречаются крупные включения сложного состава – фосфиды, троилит, добреелит и хромит заметные невооруженным глазом (Рис.4).

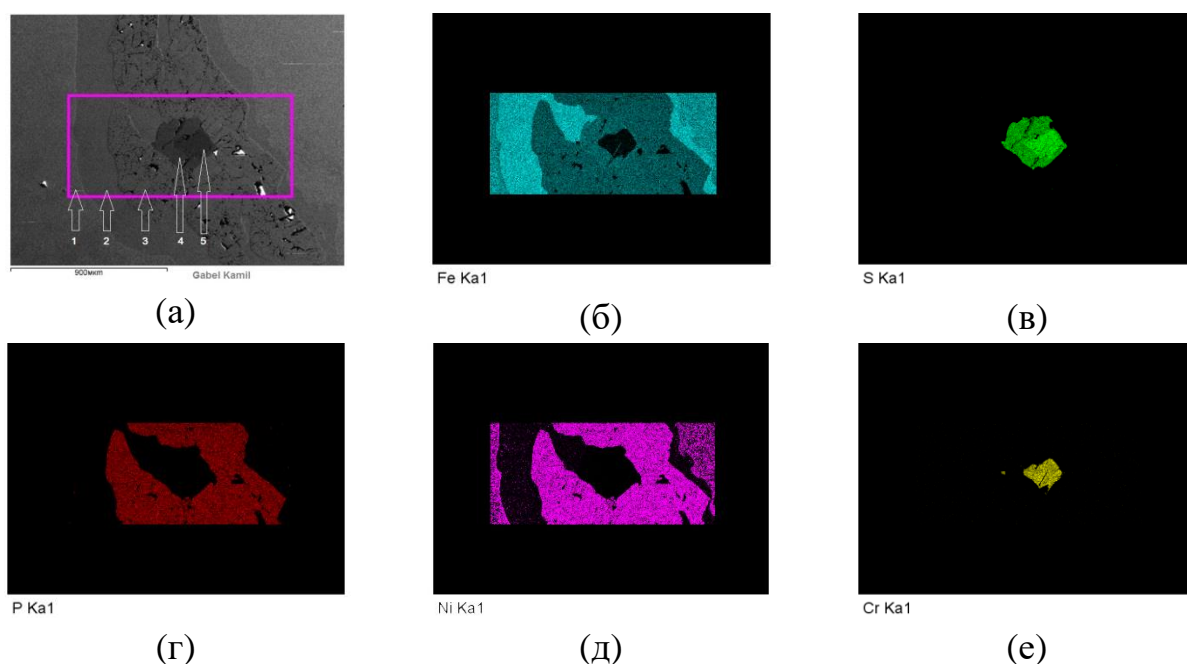


Рисунок 4 – Макро-включение в зерне α -фазы в метеорите Gebel Kamil: (а)-

Электронное изображение: 1 – Плессит: Fe 79,72 ат.%, Ni – 20,28 ат.%,

2 – α -фаза: Fe 93,27 ат.%, Ni – 6,73 ат.%, 3 – Фосфид: Fe – 46,75 ат.%,

Ni – 26,98 ат.%, P – 26,27 ат.%, 4 – Троилит: Fe 49,33 ат.%, S – 50,66 ат.%,

5 – Добреелит: Fe 14,57 ат.%, S – 55,96 ат.%, Cr – 27,25 ат.%;

(б)-(е) –Карта распределения элемента по включению:

Fe, S, P, Ni,Cr, соответственно

Вблизи таких включений (рис.4) структура ориентированного плессита в Gebel Kamil приобретает макро-масштабы, и видна даже в оптический микроскоп (рис.1б). При анализе области плессита с макро-структурой, как и в метеорите Ноба, была отмечена значительная распространенность Р в виде мелких включений (вероятно, шрейберзита). Методом EBSD с помощью анализа ППФ также удалось идентифицировать фосфид $(\text{FeNi})_3\text{P}$ в зерне α -фазы.

При EBSD – анализе области ориентированного плессита, включающей видманштеттовский треугольник (рис.1 б) было установлено, что треугольник образован зернами двух ориентаций из трех присутствующих в плессите – две грани имеют одинаковую ориентацию субзерен α -фазы, что ярко демонстрируется при рассмотрении карты ориентации фаз в ходе EBSD-анализа. Ориентация γ -фазы в плессите во изученных всех метеоритах единообразна – ее направление совпадает с γ -фазой вокруг α -зерен. Это свидетельствует о сохранении ориентации родительской γ -фазы исходного монокристалла [1, 5].

Метеорит El Qoseir имеет самое низкое содержание Ni среди рассмотренных метеоритов, а содержание Р в нем такое же, как в Gebel Kamil и Tawallah Valley. Наблюдаются множественные включения Р, однако структура при этом остается однородной – состоящей из балок α -фазы среднего размера $\sim 10 \times 50$ мкм с малыми промежутками плессита, ориентированного по росту балок. Лишь изредка 1×25 мм² встречаются макро-балки α -фазы $\sim 500 \times 150$ мкм, имеющие макро-зародыши шрейберзита (Fe – 51,27 вес.%, Ni – 32,82 вес.%, Р – 15,91 вес.%). Плессит, находящийся между балками α -фазы имеет 13,3 – 14,42 вес.% Ni. Субзерна α -фазы имеют видманштеттовую ориентацию (Рис.1 в) и не имеют четких границ, как в Ноба (Рис.3). Структура плессита в El Qoseir характерна для IVA метеоритов, но также как в описанных атакситах IVB, в его формировании принимает участие Р.

Заключение

Таким образом, сульфидные и фосфидные неметаллические включения в высоконикелевых метеоритах являются местами предпочтительного зарождения как α - Fe(Ni) при диффузионном зарождении $\gamma \rightarrow \alpha$, так и способствуют получению ориентированной структуры плессита с видманштеттовой ориентацией сосуществующих фаз при бездиффузионном превращении бейнитного типа: $\gamma \rightarrow \alpha_2 + \gamma \rightarrow \alpha + \gamma + \text{Ph}$.

Образование микровключений шрейберзита $(\text{FeNi})_3\text{P}$ вокруг крупных включений троилита-добреелита в метеорите Ноба предположительно

связывается с термодинамикой процесса кристаллизации из расплава, когда вокруг неметаллических включений образуется зона с повышенной температурой, где Р успевает выделиться в виде соединения с Fe-Ni. Таким образом, в высоконикелевых метеоритах присутствие Р приводит к развитию структуры ориентированного плессита.

Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

Библиографический список

1. Природа полос селективного отражения в метеоритном сплаве Fe-17 вес.% Ni / В. И. Гроховский, К. А. Уймина, Л. Е. Карькина [и др.] // XIX Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» : сб. материалов. – Екатеринбург, 2008. – С. 24.
2. On the Oriented Sheen in Ataxites / V. F. Buchwald // Meteoritics. – 1981. – Vol. 16. – P. 298–299.
3. Текстурное состояние и кристаллографические особенности ОЦК- и ГЦК-фаз Fe-17% Ni метеорита Чинге / В.М. Гундырев, В. А. Теплов, И. Г. Кабанова [и др.] // Физика металлов и металловедение : ФММ. – 2003. – Т. 95, № 2. – С. 72–80.
4. Некоторые структурные особенности закалённых монокристаллов конструкционной стали, выращенных из расплава / В. М. Счастливцев, Д. П. Родионов, В. Д. Садовский, Л. В. Смирнов // Физика металлов и металловедение : ФММ. – 1970. – Т. 30, №. 6. – С. 1238–1244.
5. Badekha K. A. Study of Schlieren bands in the ataxites using EBSD method / K. A. Badekha, V. I. Grokhovsky, G. A. Yakovlev // Meteoritics & Planetary Science. – 2012. – Vol. 46, № S 1. – P. A49.
6. Yang J. The formation of the Widmanstätten structure in meteorites/ J. Yang, J. I. Goldstein // Meteoritics & Planetary Science. – 2005. – Vol. 40. – P. 239–253.
7. Buchwald V. F. Handbook of Iron Meteorites / V. F. Buchwald. – Berkley : University of California Press, 1975. – 375 p.
8. Axon H. J. A metallographic study of some iron meteorites of high nickel content / H. J. Axon, P. L. Smith // Mineralogical magazine. – 1972. – Vol. 38. – P. 736–755.
9. Doan A. S. Jr. The effect of phosphorus on the formation of the Widmanstätten pattern in iron meteorites / A. S. Jr. Doan, J. I. Goldstein // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1972. – Vol. 36. – P. 51–79.
10. Buchner E. Buddha from space – An ancient object of art made of a Chinga iron meteorite fragment / E. Buchner, M. Schmieder, G. Kurat [et al.] // Meteoritics & Planetary Science. – 2012. – Vol. 47. – P. 1491–1501.

11. Goldstein J. I. The formation of plessite in meteoritic metal / J. I. Goldstein, J. R. Michael // *Meteoritics and Planetary Science*. – 2006. – Vol. 41, № 4. – P. 553–570.
12. Rasmussen K. L. Compositional trends and cooling rates of group IVB iron meteorites / K. L. Rasmussen, D. J. Malvin, V. F. Buchwald, J. T. Wasson // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1984. – Vol. 48. – P. 805–813.
13. Campbell A. J. Compositions of group IVB iron meteorites and their parent melt / A. J. Campbell, M. Humayun // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2005. – Vol. 69. – P. 4733–4744.
14. Modeling fractional crystallization of group IVB iron meteorites / R. J. Walker, W. F. McDonough, J. Honesto [et al.] // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2008. – Vol. 72. – P. 2198–2216.
15. Gebel Kamil: The iron meteorite that formed the Kamil crater (Egypt) / M. D'Orazio, L. Folco, A. Zeoli, C. Cordier // *Meteoritics and Planetary Sciences*. – 2011. – Vol. 46. – P. 1179–1196.
16. Дьяконова М. И. Химический состав метеоритов / М. И. Дьяконова, В. Я. Харитонов, А. А. Явнель ; отв. ред. Н. Н. Басаргин. – Москва : Наука, 1979. – 68 с.
17. Campbell A. J. Siderophile element abundances in the Ni-rich ataxites Gebel Kamil and Tinnie / A. J. Campbell, M. Humayun // 43rd Lunar and Planetary Science Conference (Woodlands, March 19–23 2012). – Woodlands, 2012. – P. 2833pdf.
18. Mineralogy of silicate inclusions in the Elga IIE iron meteorite/ S. N. Teplyakova, C. A. Lorenz, M. A. Ivanova [et al.] // *Geochemistry International*. – 2018. – Vol. 56, Is. 1. – P. 1–23.